

зменшується. Відповідно в моменти часу t_1 та t_2 змінюється струм навантаження i_R (рис.3, а) та сумарний струм навантаження і конденсатора ТКРП i_x (рис.3, б). З рис.3, в видно, як СК на зміну струму навантаження відповідає зміною кута відкривання тиристорів ФР. На рис.3 г показано струм, споживаний від джерела живлення.

З результатів моделювання випливає, що система реагує на зміну струму навантаження із запізненням на 0,01÷0,015 с (залежно від моменту зміни струму навантаження).

Таким чином, розроблений принцип керування тиристорним компенсатором з метою оптимальної компенсації струму навантаження, що відрізняється від відомого [6] вдвічі вищою швидкістю. Результати математичного моделювання підтвердили, що максимальне запізнення запропонованого компенсатора складає півтора півперіоду (0,015 с). Результати досліджень можуть бути основою для розробки швидкодіючих оптимальних методів керування трифазними компенсаторами.

1.G.Fusco, A.Losi, M.Russo. Adaptive Voltage Regulator Design for Static VAR Systems. Control Engineering practice, No. 9, 2001.

2.Ивакин В.Н., Сысоева Н.Г., Худяков В.В. Электропередачи и вставки постоянного тока и статические тиристорные компенсаторы / Под ред. В.В.Худякова. – М.: Энергоатомиздат, 1993. – 336 с.

3.Статические компенсаторы для регулирования реактивной мощности: Пер. с англ. / Под ред. Р.М. Матура. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 160 с.

4.Яценко А.А., Точилин В.В., Пономарев В.А., Матюнин Ю.В. Кибернетическая модель системы пофазового управления тиристорным компенсатором реактивной мощности // Известия вузов. Электромеханика. – 1987. – №8. – С.99-104.

5.Худяков В.В., Чванов В.А. Управляемый статический источник реактивной мощности // Электричество. – 1969. – №1. – С.29-35.

6.A.Exposito, F.Vazquez, C.Mitchell. Microprocessor-Based Control of an SVC for Optimal Load Compensation. IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 7, No. 2, 1992. – p.706-712.

7.Ягуп В.Г. Автоматизированный расчет тиристорных схем. – Харьков: Вища шк., 1986. – 160 с.

Отримано 26.02.2007

УДК 621.315.66

І.М.ПІЛІПЕНКО

ВАТ «Полтаваобленерго»

В.Ф.РОЙ, д-р фіз.-матем. наук

Харківська національна академія міського господарства

ДИНАМІКА ВІДМОВ ЕЛЕМЕНТІВ ЛЕП У ПРОЦЕСІ ЕКСПЛУАТАЦІЇ

Досліджуються причини відмов елементів повітряних ЛЕП під дією різноманітних зовнішніх факторів і пропонуються заходи щодо підвищення надійності їх функціональ-

них параметрів у процесі експлуатації.

Технічний стан повітряних ліній (ПЛ) електропередач безпосередньо впливає на надійність електричних мереж, а перерви в електропостачанні споживачів призводять до великих народногосподарських збитків, пов'язаних з недовипуском продукції, простоями технологічного обладнання, псуванням сировини та матеріалів. Тому з'ясування причин виходу з ладу елементів ПЛ є однією з важливих передумов розробки ефективних методів протидії факторів, що негативно впливають на роботоспроможність її елементів та всієї електроенергетичної системи в цілому.

Метою даної роботи є вивчення та аналіз процесів, що відбуваються в елементах ПЛ під дією різноманітних зовнішніх факторів, які погіршують їх функціональні параметри і знижують регламентний строк служби, і надати рекомендації щодо підвищення надійності систем енергопостачання.

Одним з найважливіших елементів ПЛ, що містить на собі всі інші елементи лінії, є опори. Незважаючи на те, що тільки 35% відключень електроенергії пов'язано з руйнуванням опор, але саме це призводить до найбільших витрат часу, коштів та людських ресурсів для їх відновлення. Як свідчить багаторічна статистика, основною причиною масового пошкодження опор ПЛ напругою до 154 кВ є екстремальні ожеледно-вітрові навантаження. Особливо вразливі до ожеледно-вітрових навантажень лінії, що проектувались до 1971 року, бо розраховувались на вдвічі меншу ніж тепер величину повторюваності цих навантажень. Стійкість опор ПЛ залежить також і від їх характеру і конструктивних особливостей. Так, приблизно з 22655 км ПЛ України напругою 35-800 кВ, залізобетонні (ЗБ) опори складають 57, металеві – 25, а дерев'яні – 18% загальної довжини. При цьому, середній термін експлуатації ПЛ високої напруги на ЗБ опорах склав 25, металевих 36, а дерев'яних 41,4 роки [1].

Проведений аналіз свідчить, що технічний стан повітряних ПЛ визначається цілим рядом факторів, таких, зокрема, як корозія металевих опор та розвинуті дефекти залізобетонних, загиванням дерев'яних елементів конструкцій та ін. Дослідження причин пошкодження ПЛ напругою до 150 кВ внаслідок ожеледно-вітрових навантажень, проведений за допомогою комп'ютерного моделювання показали, що фактичне навантаження від спільної дії вітру і ожеледі в деяких областях України досягало 47 Н/м, а відкладання на проводах складало до 50÷100 мм при вітрі 16 м/с. При цьому, найбільша кількість зруйнованих опор припадала на ПЛ 6-10 кВ. Так, в деяких місцях Харківської

області ожеледоутворення при дощі мало стрімкий характер і вага льоду досягала понад 7 кг/м, в результаті чого було ушкоджено 1908 опор і вийшло з ладу 177 км ПЛ. Аналіз ушкоджень свідчить, що ПЛ-35 кВ, спроектовані до 1971 р., виходять з ладу при товщині ожеледі, що перевищує нормовану в 1,5 раза в основному за рахунок обриву проводів. У той же час ПЛ-10 кВ, запроектовані після 1971 р. руйнуються при ожеледі, більшу за нормативну приблизно в 1,2 рази за рахунок як обриву проводів, так і падіння проміжних опор. ПЛ-10 кВ, збудовані після 1988 р., руйнуються при ожеледі, що перевищує нормативну в два рази і вітру понад 15 м/с внаслідок падіння проміжних опор і опор анкерного типу та частково обриву проводів. ПЛ 35-150 кВ, збудовані після 1985 р., в основному руйнуються при перевищенні нормативної ожеледі в 2,2-2,5 рази і наявності вітру понад 15 м/с. Причинами падіння опор ПЛ уздовж лінії в переважній більшості є однобічне тяжіння проводів при обриві внаслідок перевищення вітрового навантаження, а в перпендикулярному напрямку – завдяки вітровому навантаженню на проводи з ожеледдю.

Аналіз відмов ПЛ від терміну служби, проведений на основі оцінки параметру потоку $P(t)$, свідчить [1], що він спочатку знижується після періоду прироблення, деякий час залишається незмінним, а по закінченні регламентного терміну служби починає підвищуватись через старіння елементів ПЛ аж до моменту капітального ремонту. Потік відмов $P(t)$ містить дві складові, одна з яких обумовлена зносом та старінням елементів ПЛ і визначається терміном служби $P_1(t)$, тоді як інша $P_2(t)$ обумовлена впливом зовнішніх факторів. Перша складова потоку відмов $P_1(t)$ обумовлена внутрішніми факторами: корозією та старінням металевих елементів опор, проводів, тросів, ізоляторів, карбонізацією бетонних елементів опор, – тому зменшення цього параметру можливо за рахунок підвищення якості обслуговування обладнання ПЛ та використання елементів електрообладнання підвищеної якості.

Інша складова обумовлена дією екстремальних зовнішніх факторів, дефектами монтажу та експлуатації, кліматичними негодами та ін. Тому параметр $P_2(t)$ практично не залежить від тривалості експлуатації і може бути зменшений за рахунок якості мережного будівництва та покращення властивостей конструкційних матеріалів і електричної арматури. Це підтверджується динамікою зростання пошкоджень ПЛ в період з 1981 по 1996 рр. в Україні.

Статистика відмов свідчить, що у більшості випадків руйнування опор відбувається при перевищенні нормованих показників вітрово-

ожеledного навантаження в опорах зі строком служби більше 10-16 років [2], а також внаслідок появи дефектів і ушкоджень в процесі виготовлення, монтажу або експлуатації, причому для опор зі строком експлуатації менш 10 років – саме ці причини складають понад 85% усіх відмов.

Дані досліджень 1971-1982 рр. свідчать [2], що структура розподілу відмов для усіх трьох видів опор приблизно однакова. Сьогодні ЗБ опори знаходяться в стадії стабільного стану і їх пошкоджувальність протягом останніх 20 років залишалась практично незмінною. Металеві опори у період стабільного стану мали потік відмов у 1,5 рази менше, ніж ЗБ опори. Досвід експлуатації свідчить, що основною причиною суттєвої різниці у пошкоджувальності ЗБ опор є недостатня несуча здатність внаслідок неякісного закладання їх у ґрунт, значна маса конструкції, яка дуже чутлива до відхилення від вертикалі, що збільшує імовірність падіння. Важливою причиною зменшення надійності ЗБ опор є також приховані дефекти конструкції: відхилення та обрив арматури, неякість бетону і сталі, раковини, порожнечі та ін. У металевих опорах такі причини відсутні, тому основним фактором зменшення їх надійності є перевищення нормованих навантажень і корозійний знос елементів при тривалій експлуатації. Більша експлуатаційна стійкість металевих опор обумовлена, зокрема, ізотропністю сталі і спроможністю її до розвитку пластичних деформацій, що сприяє перерозподілу зусиль в опорі при виникненні перенапруг в окремій частині її конструкції.

Найбільше число відмов ПЛ 35÷500 кВ припадає на пошкодження дерев'яних опор, число яких на порядок вище, ніж у інших. Це пояснюється значною втратою міцності деревини внаслідок процесу загнивання елементів дерев'яних конструкцій. Однак, при вводі в експлуатацію, дерев'яні опори мають більше запасу механічної міцності ніж інші, більшу електричну міцність, не приводять до «ефекту доміно» при падінні однієї опори.

Аварійність ПЛ безпосередньо пов'язана з недостатнім урахуванням кліматичних факторів у зоні проходження траси, а також недосконалістю методик вибору проводів і типів опор. Недоврахування кліматичних навантажень при проектуванні ПЛ може призводити до аварійних ситуацій і, як наслідок, до перерви електропостачання. Кліматичне навантаження при розробці конструкцій ПЛ повинні враховуватись на підставі карт територіального районування України за такими параметрами, як швидкість вітру, інтенсивність і густина ожеledно-паморозних відкладень, температура повітря, грозова діяльність у зоні траси лінії. Необхідно також враховувати вплив мікрокліматичних

факторів, обумовлених особливостями ландшафту: рельєфу місцевості, висоти над рівнем моря, лісових масивів та ін.

Порушення працездатності лінійної арматури ПЛ можна класифікувати за такими ознаками, як: наслідки впливу атмосферних явищ, що перевищують нормовані значення; знакозмінні механічні навантаження (вібрація, пляска проводів, температурні перепади); дефекти виготовлення, монтажу, ремонту та ін. Вібрація або пляска проводів, викликана вітром без ожеледі, призводить до періодичних перегибів у місцях їх кріплення, що поряд зі статичними навантаженнями від налягання визиває «втомні» ушкодження лінійної арматури і системи підвіски. У ПЛ з підвищеною вібрацією спостерігається руйнування гасителів вібрації, скидання вантажиків, переміщення їх у середину прольоту та ін. Наслідком тривалої пляски (галоупування) проводів є також руйнування підвісної та зчепної арматури, ушкодження дистанційних розпорок, захисної арматури, проводів і грозозахисних тросів. При чому, в першу чергу, циклічні впливи руйнують вузли, що мають жорстку конструкцію і працюють при великих навантаженнях. Внаслідок пляски проводів ПЛ 35-750 кВ до 90% цих коливань призводить до порушення роботи елементів лінії і перебоїв у постачанні електроенергії на досить тривалий час. Аналіз статистичних даних показує [3], що основною причиною ушкодження проводів і грозозахисних тросів є перевищення навантажень, а також зниження їхньої несучої здатності внаслідок зносу від дії вібрації, пляски і корозії сталевих сердечників проводів і сталевих тросів. Відмови, пов'язані з втратою несучої здатності проводів і тросів, збільшуються приблизно на 3-5% на рік, що свідчить про прогресуючий знос проводів через недостатню захищеність від вібрації і пляски, а сталевих тросів – від корозії металу.

Іншою причиною порушення працездатності лінійної арматури є дефекти виготовлення, монтажу та ремонту елементів ПЛ, що може бути усунуте завдяки покращенню контролю при виготовленні, монтажу та експлуатації. У загальній кількості порушень роботи ПЛ пошкоджуваність від псування ізоляції складає 10-15%, основною причиною чого є атмосферні перенапруження, які призводять до 60% усіх відмов, викликаних пошкодженням ізоляції і майже не змінюються до сьогодні. Це свідчить, зокрема, про достатній рівень обслуговування електричних мереж за цією категорією елементів ПЛ.

Таким чином, виконаний аналіз свідчить, що в діючих системах енергопостачання існує ряд серйозних проблем щодо забезпечення безперебійного функціонування елементів ПЛ. Шляхам вирішення багатьох з них сприяє впровадження з 2006 р. УкрПУЕ [4], що нормує порядок проектування і реконструкції ліній відповідно до останніх

рекомендацій МЕК [5] щодо принципів побудови систем електропостачання. Одним з важливих аспектів даного документа є деталізація кліматичних факторів, а також більш обґрунтований вибір коефіцієнтів надійності ПЛ при розрахунку динамічної стійкості опор. Наведена методична база по визначенню кліматичних навантажень відповідає сучасним міжнародним вимогам щодо точності визначення їх дії.

Основна складність врахування кліматичних навантажень при проектуванні реконструкцій ПЛ полягає в необхідності об'єктивно визначити поточний стан конструкції лінії. Вирішення цієї проблеми стикається з досить складним завданням об'єктивної оцінки технічного стану елементів ПЛ, яке повинно базуватись на оцінці ризику аварії і можливих фінансових наслідках, пов'язаних з можливою відмовою лінії.

Основним постулатом цих вимог є той факт, що ризик аварії зведений до економічно обґрунтованого рівня при умові, що методика визначення цього ризику дає змогу отримати достовірні результати обстеження ПЛ, що відповідає концепції аналогічного документу МЕК [6].

Наведені рекомендації дають змогу оптимізувати процеси, пов'язані з визначенням строків проведення ремонтно-поновлювальних робіт ПЛ, визначати можливість зменшення навантажень, що дозволяє мінімізувати фінансові витрати на поновлення їх функціональних можливостей, оскільки реконструкція ПЛ є економічно вигідною, бо потребує на проведення ремонтно-поновлювальних робіт на порядок менших витрат, чим на їх повну заміну. При визначенні остаточного строку служби ПЛ після реконструкції, згідно вимогам УкрПУЕ, можливо здійснювати коригування базового періоду повторюваності характеристичних значень ожеледно-вітрових навантажень на конструкції з урахуванням аналізу статистики відмов за даними елементами і оптимізувати, таким чином, строки проведення ремонтно-поновлювальних робіт, що дає змогу значно знизити витрати на реконструкцію не погіршивши при цьому надійності енергозабезпечення. Це дозволяє обґрунтовано продовжувати ресурс ПЛ і оптимізувати співвідношення параметрів: витрати на реконструкцію – надійність – імовірність відмов.

1.Яковлев Л.В. Оценка технического состояния воздушных линий электропередачи напряжением 35-750 кВ и мероприятия по повышению их надежности // Электрические станции. – 1998. – №6. – С. 25-33.

2.Турбин С.В. Основные положения методики учета гололедно-ветровых нагрузок на строительные конструкции для ДНБ «Нагрузки и воздействия» // Вісник ДонНАБА. Вип.5 (61). – Макіївка, 2006. – С.23-29.

3.Кошиц И.Н., Клямкин С.С. и др. Новые грозозащитные тросы и провода // Энергетик. – 2004. – №4. – С.14-17.

4.Правила устройства электроустановок. Глава 2.5. Воздушные линии электропередачи напряжением выше 1 кВ до 750 кВ. – К., 2006. – 190 с.

5.IEC 60826 Design criteria of overhead transmission lines // 11/165A/CDV/-Ed.3. – 2002. – 186 p.

6.Guidelines for Meteorological cling Models, statistical and Topografical Effects // Paris: CIGRE SC B2 WG 16 TF3. – May 2005. – Draft, rev. 6. – 100 p.

Отримано 14.03.2007

УДК 621.313

Г.В.КАПУСТИН, канд. техн. наук, В.Б.ФИНКЕЛЬШТЕЙН, д-р техн. наук,
Я.Б.ФОРКУН, канд. техн. наук

Харьковская национальная академия городского хозяйства

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ С УДАЛЕННЫМИ КОРОТКОЗАМЫКАЮЩИМИ КОЛЬЦАМИ НА РОТОРЕ

Проведен уникальный эксперимент на асинхронном двигателе с короткозамкнутым ротором, у алюминиевой «беличьей клетки» которого были удалены короткозамыкающие кольца.

При проектировании короткозамкнутых асинхронных двигателей (АД) с высотой оси вращения 200 мм и выше наблюдается значительное расхождение экспериментальных данных с расчетными по следующим нормирующим параметрам: экспериментальные данные кратности пускового тока и кратности пускового момента значительно превосходят расчетные, на которые проектировался конкретный асинхронный двигатель. Было сделано предположение, что эти расхождения связаны с тем, что при расчете учитывается только ток в роторе, протекающий согласно классической теории в короткозамкнутой «беличьей клетке», и не учитывается ток в роторе, который протекает по другим элементам конструкции ротора, что приводит к созданию дополнительного пускового момента, и соответственно к увеличению пускового тока.

Согласно классической теории короткозамкнутых асинхронных двигателей [1] разрыв в цепи обмотки ротора приводит к полной потере работоспособности асинхронного двигателя, так как отсутствует ток, который взаимодействует с вращающимся магнитным полем статора. В данной работе это утверждение было подвергнуто экспериментальной проверке.

Для разрыва цепи короткозамкнутой алюминиевой клетки ротора были полностью удалены оба короткозамыкающих кольца. После это-